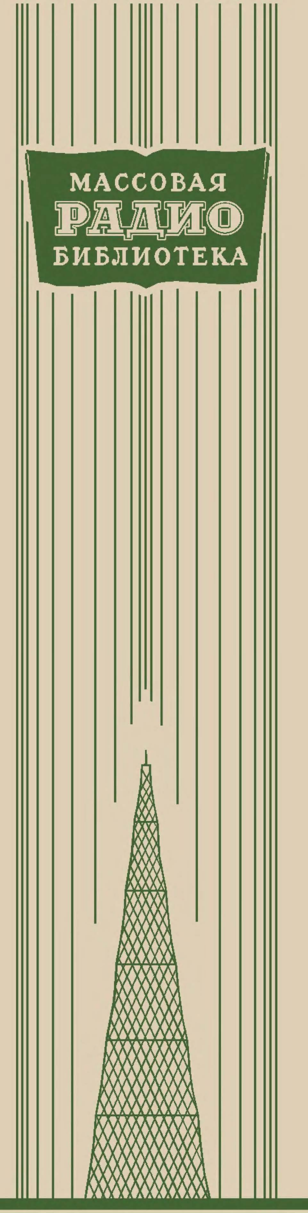


И. Ш. ЛИБИН

СТРОБОСКОПЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

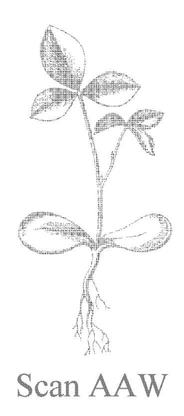
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
1956

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 246

И. Ш. ЛИБИН

СТРОБОСКОПЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1956 ЛЕНИНГРАД

В брошюре содержатся основные сведения о стробоскопических приборах, их назначении и применении. В ней приведены данные, достаточные для изготовления простейших стробоскопов силами радиолюбителей.

Брошюра рассчитана на подготовленного радиолюбителя и может оказать ему помощь в решении некоторых задач, возникающих в его производственной деятельности.

СОДЕРЖАНИЕ

Автор *Либин Израиль Шнеерович* — „Стробоскопы и их применение"

* * *

Редактор *К. С. Вульфсон* Технич. редактор *И. М. Скворцов*

* * *

Сдано в набор 21/II 1956 г. Подписано к печати 23/V 1956 г.
Бумага $84 \times 108^{1}/_{32}$ Объем 2,05 п. л. Уч.-изд. л. 2,5
Т-05702 Тираж 25 000 экз. Цена 1 р. Заказ № 1121

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Появление маломощных электрических двигателей, воздушных турбин, гироскопов, вибропреобразователей и других специальных устройств потребовало создания приборов, пригодных для точного измерения числа оборотов без отбора мощности от исследуемого объекта. Развитие тяжелого машиностроения заставило обратить серьезное внимание на изучение вибраций и динамических напряжений, возникающих при работе крупных машин на больших скоростях. При эксплуатации двигателей и генераторов электрического тока оказалось необходимым выяснить ряд вопросов, связанных со скольжением и качанием их ротора. Создание серийного производства подняло культуру производства на новую ступень и потребовало изыскания таких методов контроля, которые могли бы обеспечить наибольший экономический и технический эффект при минимальной затрате труда и времени. Для решения некоторых научных и технических проблем понадобилось производить скоростную киносъемку со столь малым временем экспозиции, которое не может быть обеспечено обычными механическими затворами.

Множество подобных задач успешно решается в настоящее время при помощи различных стробоскопических приборов. Однако до сих пор вопросу создания стробоскопических приборов и правильного их применения еще не уделяется достаточного внимания.

В отечественной литературе стробоскопический метод освещен пока еще слабо, а отечественное приборостроение в этой области лишь начинает создаваться.

Для внедрения стробоскопических методов важно не только заинтересовать широкий круг лиц результатами применения стробоскопических приборов, но и разъяснить принципы их работы и конструирования.

СТРОБОСКОПИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ И УСЛОВИЯ ЕГО НАБЛЮДЕНИЯ

Каждому фотолюбителю хорошо известно, что для съемки движущихся предметов следует выбирать время экспозиции достаточно малым. Чем быстрее движется предмет, тем короче должно быть время экспозиции, необходимое для получения четкого, «неразмазанного» фотоснимка.

Прогресс, достигнутый за последние годы в области разработки фотографических материалов и оптики, а также применение специальных осветителей позволяют в настоящее время делать высококачественные снимки при времени экспозиции порядка миллионных долей секунды.

Мгновенная фотография играет важную роль в науке и технике, позволяя получить множество ценных сведений о природе различных быстро протекающих процессов. Достоинство метода фотографирования при изучении быстро протекающих явлений заключается в том, что процесс получения изображения разделен во времени от процесса изучения этого изображения. За короткое время экспозиции фотопластинка успевает «запомнить» характерные особенности явления и в дальнейшем сохраняет их в течение практически бесконечного промежутка времени. Фотопластинка в науке и технике служит надежным и беспристрастным свидетелем. К сожалению, однако, самый лучший фотоснимок не в состоянии заменить исследователю непосредственное зрительное восприятие. Недаром говорят: — «я это видел собственными глазами»!

Но как рассмотреть быстро перемещающийся предмет? Прежде всего необходимо, как и при фотографировании, чтобы за время наблюдения рассматриваемый объект не успел заметно переместиться. Этого нетрудно добиться, ограничив время наблюдения при помощи достаточно быстродействующего затвора. Но ведь в отличие от фотопластинки человеческий глаз способен сохранять зрительное восприятие лишь на десятые доли секунды, и только этим

временем располагает наблюдатель для ознакомления с движущимся предметом. Очевидно, что за столь короткий промежуток времени невозможно составить правильное представление об исследуемом объекте.

Казалось бы, на первый взгляд, что подобное препятствие является непреодолимым. Такое заключение, однако, было бы чересчур поспешным, а поспешные выводы в науке редко бывают правильны. Существует важная группа быстро протекающих явлений, для визуального (зрительного) изучения которых может быть предложен простой и изящный способ.

Представим себе наблюдателя, вооруженного быстродействующим затвором, сквозь который он рассматривает вращающуюся деталь. Пусть срабатывание затвора происходит всякий раз, когда деталь оказывается в некотором определенном положении. При таком условии затвор сработает столько раз в секунду, сколько оборотов в секунду делает вращающаяся деталь. Очевидно, что при каждом срабатывании затвора наблюдатель на мгновение увидит вращающуюся деталь и притом в строго одинаковом положении. Если вспомнить о свойстве человеческого глаза сохранять зрительное восприятие в течение десятых долей секунды, то станет ясно, что при частоте срабатывания затвора более 10 раз в секунду вращающаяся деталь будет казаться наблюдателю неподвижной. Отдельные кадры аналогично тому, как это имеет место в кино, сольются в единую, неподвижную картину. Такое явление называется стробоскопическим эффектом, а приборы, обеспечивающие условия наблюдения, необходимые для создания этого эффекта, — стробоскопами.

Ниже мы подробнее остановимся на применении стробоскопических приборов; пока же отметим лишь, что стробоскопический эффект чрезвычайно полезен для изучения многих периодических явлений с периодом порядка 0,1 сек. и меньше.

Независимо от того, к какому типу принадлежит стробоскопический прибор и для какой цели он предназначен, основная роль его заключается в такой трансформации зрительного восприятия, благодаря которой движущийся объект кажется как бы неподвижным или заторможенным.

С одним из принципов подобной трансформации мы уже познакомились; вспомним о наблюдателе, вооруженном периодически работающим быстродействующим затвором.

Другой способ создания стробоскопического эффекта заключается в том, что исследуемую деталь освещают кратковременными световыми вспышками. Если частота повторения световых вспышек совпадает с числом оборотов детали в секунду, а интервал времени между вспышками (период) меньше 0,1 сек., то очевидно, что и в этом случае вращающаяся деталь покажется наблюдателю неподвижной.

Возникает, однако, естественный вопрос, не является ли необходимым, чтобы при таком способе создания стробоскопического эффекта рассматриваемая деталь находилась в затемненном помещении? Оказывается, что при достаточной интенсивности световых вспышек необходимости в этом нет. Количественное соотношение между интенсивностью световых вспышек и постоянной освещенностью исследуемого объекта (фоном), при котором еще возможно четкое наблюдение стробоскопического эффекта, весьма сложно. Это соотношение определяется так называемой контрастной чувствительностью глаза, которая в свою очередь зависит от интенсивности световых вспышек и фона, от частоты повторения вспышек, а также от свойств исследуемого объекта. Подробное рассмотрение этого вопроса далеко выходит за рамки настоящей брошюры. Поэтому в дальнейшем при ознакомлении с различными стробоскопами мы постараемся давать качественные характеристики создаваемой ими освещенности.

Обратимся теперь к вопросу о соотношении между длительностью вспышки (или временем открытия затвора) и скоростью движения исследуемой детали, при котором возможно четкое ее наблюдение. Если длительность вспышки t сек., а линейная скорость детали v, то за время вспышки деталь сместится на величину

$$\Delta = vt$$

и, таким образом, покажется наблюдателю несколько размытой. Обозначим допустимое размытие детали через $\Delta_{доп}$, скорость ее вращения в об/мин — через N и ее диаметр — через d. На основании предыдущего соотношения нетрудно показать, что для получения достаточно малого размытия необходимо, чтобы

$$t \leqslant \frac{60\Delta_{доп}}{\pi d N}.$$

Вопрос о том, какое размытие можно считать допустимым, зависит от назначения прибора. Так, для визуального

исследования деформаций нередко $\Delta_{доп}$ не должно превышать 0,1 *мм*. В этом случае из полученного соотношения следует, что при скорости вращения 10 000 об/мин и диаметре детали 100 *мм* длительность вспышки не должна превышать двух миллионных долей секунды. Такую длительность вспышки способны обеспечить лишь лучшие стробоскопы. Размытие, допустимое при измерении скорости вращения, может быть значительно большим. В связи с этим соотношение между длительностью вспышки и интервалом между вспышками нередко составляет у строботахометров несколько процентов.

Остановимся еще на одной особенности стробоскопического эффекта, играющей важную роль при измерении скорости вращения или колебания при помощи строботахометра.

Попытаемся ответить на вопрос, каким должен казаться наблюдателю вращающийся диск, снабженный какой-либо меткой, при различном соотношении между скоростью вращения диска N и частотой вспышек (или срабатываний затвора) f.

Мы уже знаем, что при $f = N$ наблюдатель увидит вращающийся диск таким, каким он видит этот диск в неподвижном состоянии. Нетрудно понять, что такую же картину наблюдатель увидит и тогда, когда частота вспышек в целое число раз меньше числа оборотов диска. В самом деле, хотя при таком условии диск в интервале между двумя вспышками успеет сделать не один, а несколько оборотов, все же при каждой вспышке он всегда окажется в одинаковом положении.

Иначе обстоит дело, если частота вспышек в целое число раз больше числа оборотов диска. В этом случае в интервале между двумя вспышками диск успеет повернуться лишь на часть оборота и окажется в первоначальном положении только после нескольких вспышек. Наблюдатель увидит вращающийся диск в нескольких различных положениях, причем число таких положений будет равно отношению f/N.

Такие же кратные стробоскопические картины возникают и в том случае, когда отношение f/N может быть представлено отношением целых чисел, не имеющих общего множителя. Число неподвижных положений диска в этом случае будет равно числителю полученной дроби. Покажем это на примере. Пусть $f = 60$ *гц*, а $N = 40$ об/сек. Тогда $f/N = {}^3/_2$. Очевидно, что за время между двумя вспышками диск

успеет повернуться на $^2/_3$ оборота, т. е. на 240°. Третья вспышка застанет диск в новом положении, так как он к этому времени сделает уже $^4/_3$ оборота и переместится на $^1/_3$ оборота (120°) относительно своего первоначального положения. Зато четвертая вспышка снова застанет диск в первоначальном положении, так как к этому моменту диск сделает два полных оборота. Наблюдатель, таким образом, увидит диск в трех различных положениях, каждое из которых смещено на 120°. Получившуюся стробоскопическую картину можно представить как результат наблюдения диска при помощи трех стробоскопов, работающих со сдвигом по фазе на 120° и частотой $f/3 = 20$ *гц*. Отсюда следует, что возможность наблюдения стробоскопических картин высокой кратности ограничена тремя факторами: наложением отдельных стробоскопических картин друг на друга, конечной длительностью сохранения зрительного восприятия и падением освещенности каждой отдельной стробоскопической картины.

Существование кратных стробоскопических картин нередко приводит неопытного наблюдателя к ошибочному заключению о скорости вращения исследуемого объекта. Чтобы не допустить грубой ошибки, следует при измерениях при помощи строботахометра руководствоваться следующим простым правилом: правильным является наибольший отсчет, при котором наблюдается одно неподвижное изображение объекта.

В тех случаях, когда частота вспышек f незначительно отличается от скорости объекта N, объект кажется наблюдателю перемещающимся со скоростью $N - f$. Если $f < N$, то направление кажущегося движения совпадает с истинным, а при $f > N$ кажущееся движение имеет направление, противоположное истинному. В правильности этого положения можно без труда убедиться путем тех же рассуждений, какими мы пользовались выше при анализе кратных стробоскопических картин.

В табл. 1 приведены все разобранные нами случаи возникновения стробоскопических картин.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОБОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

Первые упоминания о стробоскопическом эффекте, как о способе физического исследования, содержатся в работах середины прошлого столетия, посвященных изучению аку-

Таблица 1

Различные стробоскопические картины и условия их возникновения

Скорость вращения N, об/мин	Частота вспышек f, всп/мин	Вид диска	Соотношение скоростей	Примечание
0	0		—	Диск неподвижен, лампа выключена
3 000	0		—	Диск вращается, лампа выключена
3 000	3 000		$f = N$	Основной синхронизм
3 000	1 500 750 3 000/n		$f = \frac{N}{n}$	Освещенность диска меньше, чем при основном синхронизме
3 000	6 000		$f = n \times N$ $(n = 2)$	Видно две точки
3 000	9 000		$f = n \times N$ $(n = 3)$	Видно три точки
3 000	$n \cdot 3\,000$		$f = n \times N$	Видно n точек
3 000	4 000		$\frac{f}{N} = \frac{4}{3}$	Видно четыре точки
3 000	1 200		$\frac{f}{N} = \frac{2}{5}$	Видно две точки
3 000	2 999		$S = N - f$	Кажущееся вращение со скоростью $S = 1$ об/мин в направлении истинного вращения
3 000	3 001		$S = f - N$	Кажущееся вращение со скоростью $S = 1$ об/мин в направлении, противоположном истинному вращению

стических явлений. Именно с этого времени стробоскопический метод исследования начинает применяться в различных областях физики. Применения эти, однако, имеют несколько случайный характер и приводят к созданию отдельных стробоскопических установок, предназначенных лишь для целей данного, конкретного исследования. Этим, повидимому, объясняется тот факт, что работы в области стробоскопии столь видных ученых, как Фарадей, Допплер, Плато, Теплер и Больцман, мало кому известны в настоящее время.

Как справедливо отметил выдающийся советский светотехник С. О. Майзель, при исследовании стробоскопического эффекта на протяжении многих лет «...в головах различных ученых, в разных странах возникали до странности одинаковые мысли, облекались почти в одинаковые слова. И от одного раза до другого эти мысли забывались, почти каждый раз приходилось снова начинать работу мысли сначала». Естественно, что при этом появлялось множество «открытий» и «изобретений», а подчас возникали даже подозрения в плагиате.

Проходит немало лет, прежде чем стробоскопический метод получает должное признание. Такой период застоя объясняется не только скудостью средств, которыми располагала техника прошлого века для создания стробоскопических приборов, но и в значительной степени отсутствием серьезных запросов на эти приборы со стороны той же техники. Родоначальники современных стробоскопических приборов — вертушки Фарадея, стробоскопы Штампфера, фенакистикопы Плато — так и остались бы забавой для детей, если бы бурно развивающаяся техника XX века не предъявила целый ряд требований, связанных с необходимостью изучения работы новых машин и механизмов.

Большое разнообразие этих требований вызвало появление многочисленных стробоскопических приборов, отличающихся как по своему назначению, так и по принципу действия.

Существующие в настоящее время стробоскопические приборы можно разделить на три основные группы: стробоскопы, стробroom тахометры и специальные стробоскопические приборы. Стробоскопы предназначаются для визуального или фотографического изучения быстро протекающих процессов. Вторая группа устройств объединяет приборы, служащие для определения скорости вращения или колебания по стробоскопическому эффекту. К третьей группе относятся

приборы различного назначения, основанные на использовании стробоскопического эффекта (строботахометр, стробокомпас и др.).

Такое подразделение не является вполне жестким, так как нередко один и тот же прибор, помимо своего основного назначения, пригоден для использования в качестве стробоскопа. Часто поэтому все стробоскопические приборы называют стробоскопами.

По принципу действия стробоскопические приборы разделяются на механические и электронные.

В механических приборах для создания стробоскопического эффекта используются вращающиеся или колеблющиеся диски, диафрагмы, зеркала, а также другие движущиеся детали. Чаще всего такие приборы применяются в качестве строботахометров. В настоящее время они вытесняются электронными приборами, так как последние более удобны и универсальны.

В электронных приборах стробоскопический эффект достигается, как правило, при помощи модулирования яркости источника света и только в редких случаях путем применения электронно-оптических затворов.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СТРОБОСКОПЫ

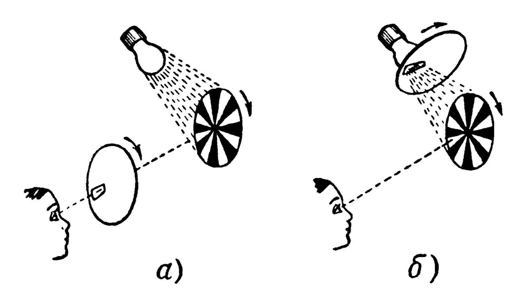
Примером простейшего механического стробоскопа может служить непрозрачный диск с радиальной прорезью, число оборотов которого плавно изменяется каким-либо способом по желанию наблюдателя.

Используя такой диск в качестве затвора и регулируя скорость его вращения в зависимости от числа оборотов наблюдаемого объекта, можно добиться возникновения различных стробоскопических картин. Для наблюдения следует поместить диск либо между глазом наблюдателя и исследуемым объектом (фиг. 1,*а*), либо между исследуемым объектом и источником света (фиг. 1,*б*). В первом случае наблюдение можно проводить при любом освещении; во втором — желательно хорошо затемнить помещение, так как иначе потребуется источник света большой мощности. При использовании второго способа стробоскопический эффект может одновременно наблюдаться несколькими лицами.

В обоих случаях для улучшения резкости наблюдаемой стробоскопической картины рекомендуется на некотором расстоянии от вращающейся прорези установить неподвиж-

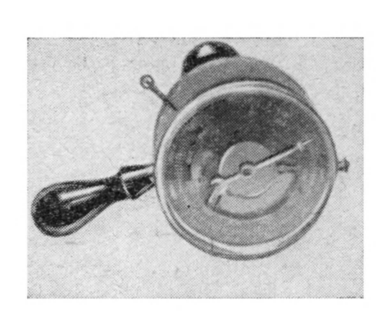
ную щель — диафрагму, которая, задерживая косые лучи, сокращает время наблюдения.

Регулировать число оборотов диска проще всего при помощи электродвигателя постоянного тока, скорость кото-



Фиг. 1. Два способа наблюдения стробоскопического эффекта.
а—с диском, помещенным между глазом наблюдателя и исследуемым объектом; *б* — с диском, помещенным между исследуемым объектом и источником света.

рого можно измерять обычным тахометром. Значительно удобнее, однако, пользоваться для измерения скорости маломощным генератором постоянного тока, находящимся на одном валу с диском. Напряжение на зажимах такого генератора, пропорциональное числу его оборотов, подается на вольтметр, шкала которого может быть отградуирована непосредственно в об/мин.



Фиг. 2. Механический стробоскоп.

На практике часто бывает невозможно сделать число оборотов диска равным числу оборотов исследуемого объекта. В этом случае диск снабжают несколькими симметрично расположенными радиальными щелями, что позволяет, как нетрудно видеть, в соответствующее число раз уменьшить обороты диска.

Существует большое количество разнообразных конструкций механических стробоскопов. Фотография одного из таких приборов приведена на фиг. 2. В этом приборе диск

с радиальными щелями вращается при помощи механизма, приводимого в действие пружиной, завод которой необходимо осуществлять в течение всего времени работы с прибором. Для изменения скорости вращения диска в приборе предусмотрена коническая фрикционная передача, передаточное число которой можно плавно регулировать путем перемещения точки зацепления вдоль образующей конуса. При изменении передаточного числа стрелка прибора, связанная с передаточным механизмом, останавливается на соответствующем делении шкалы, градуированной в об/мин. Прибор имеет два диапазона и позволяет производить измерения от 300 до 12 000 об/мин. Точность измерения составляет несколько процентов. Весит прибор около 1 *кг.*

Общий недостаток всех механических стробоскопов заключается в том, что при пользовании ими наблюдатель вынужден изучать движущийся объект в условиях весьма низкой освещенности. Объясняется это тем, что свет попадает в глаз наблюдателя лишь в момент открытия щели, которая не может быть сделана широкой из-за размытия стробоскопической картины. Так как время открытия щели не должно по указанной причине превышать 1—3% от периода явления, то условия наблюдения ухудшаются при этом в десятки раз и почти вся энергия, затраченная на освещение исследуемого объекта, теряется бесполезно.

Следует также отметить, что совершенные модели механических стробоскопов являются достаточно сложными оптико-механическими приборами, разработка и изготовление которых доступны лишь хорошо оснащенному предприятию.

СТРОБОСКОПЫ С ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА ПЕРЕМЕННОЙ ЯРКОСТИ

Рассматриваемая группа приборов является в настоящее время наиболее распространенной. Объясняется это чрезвычайно широкими возможностями их применения для самых разнообразных целей, простотой и удобством работы с ними, а также замечательными достижениями, которыми располагает современная электроника для создания подобных приборов.

Принципиальное преимущество таких стробоскопов по сравнению с механическими заключается в наивыгоднейшем использовании энергии, затраченной для освещения иссле-

дуемого объекта. Это позволяет изучать движущийся объект в условиях высокой освещенности без необходимости применения мощных осветительных установок.

Стробоскопические приборы с источниками света переменной яркости состоят из следующих основных элементов: управляемого источника света, схемы его питания, схемы, регулирующей частоту вспышек источника света, и отсчетного устройства. Вопрос о выборе источника света и других элементов прибора полностью определяется его назначением и возможностями, которыми располагает конструктор. Нельзя, разумеется, охватить ни все разнообразие задач, которые могут быть решены при помощи стробоскопических приборов, ни тем более конкретные варианты их исполнения. Представляется целесообразным поэтому в первую очередь ознакомить читателя с основными элементами стробоскопических приборов.

Источники света для стробоскопов. К источникам света для стробоскопов предъявляются следующие основные требования:

1. Источник света должен обладать большой мгновенной яркостью и силой света, обеспечивающими при малой длительности вспышки высокую освещенность исследуемого объекта. Желательно, чтобы источник света обладал хорошей светоотдачей, а спектр его излучения был благоприятен для фотосъемки.

2. Источник света должен хорошо работать в возможно большем диапазоне частот. Схема его питания и управления должна быть достаточно простой.

3. Источник света должен иметь возможно больший срок службы.

В настоящее время нет такого источника света, который одновременно в одинаковой степени удовлетворял бы всем перечисленным требованиям. Среди газоразрядных ламп, применявшихся ранее для целей стробоскопии, следует отметить тиратроны, неоновые лампы тлеющего разряда и различные типы ртутных ламп. За последние годы в стробоскопах, как правило, применяют специально разработанные для этой цели импульсные источники света.

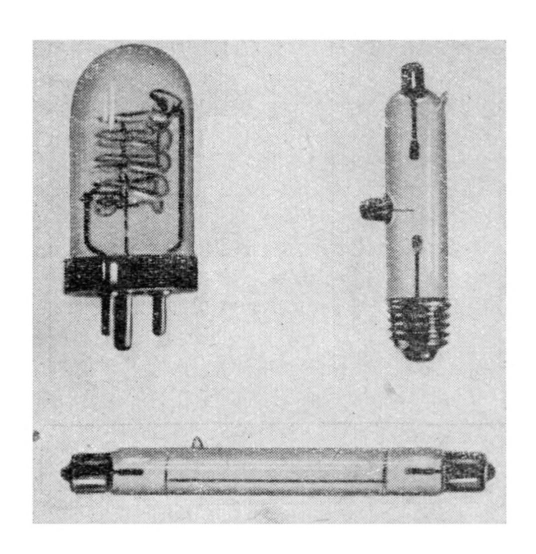
Тиратроны хорошо работают в широком диапазоне частот, схема управления ими проста и надежна, однако освещенности, которые могут быть получены при их помощи, чрезвычайно малы.

Неоновые лампы тлеющего разряда способны обеспечить несколько лучшую освещенность. Наблюдаемые при их помощи стробоскопические картины из-за большой длительности свечения этих ламп отличаются размытостью. Спектр излучения неоновых ламп тлеющего разряда мало пригоден для фотосъемки.

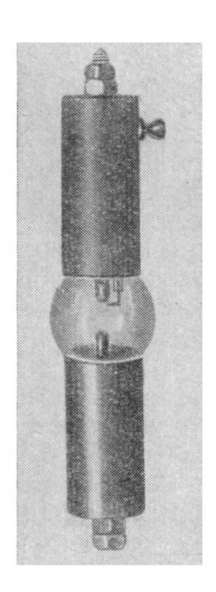
Ртутные лампы способны создавать исключительно высокую освещенность исследуемого объекта. Мгновенная сила света их в импульсном режиме достигает сотен тысяч свечей, яркость их может превышать миллион стильб (*сб*—единица яркости; яркость обычной лампы накаливания мощностью 100 *вт* составляет около 600 *сб*). Длительность вспышки таких ламп (несколько десятков микросекунд) достаточно мала для наблюдения резкой стробоскопической картины. Спектр их излучения благоприятен как для визуальных, так и для фотографических наблюдений. Основное затруднение, препятствующее широкому использованию ртутных ламп в стробоскопических приборах, заключается в сложности управления ими. Некоторым неудобством является также необходимость предварительного разогрева ртутных ламп для создания в них рабочего давления паров ртути.

Импульсный разряд за последние несколько десятилетий являлся объектом многочисленных исследований. Он может быть получен при разряде конденсатора через воздушный или газовый промежуток при условии достаточно малого сопротивления и индуктивности разрядного контура. Для импульсного разряда характерны значительный градиент потенциала порядка сотен и тысяч вольт на сантиметр, огромная мгновенная мощность, достигающая десятков тысяч киловатт, и большая концентрация энергии в разрядном промежутке, нередко составляющая десятки и сотни джоулей в кубическом сантиметре. Температура разряда достигает при этих условиях десятков тысяч градусов, а степень ионизации наполняющего разрядный промежуток вещества может приближаться к 100%. Вследствие быстрого возрастания температуры возникает скачок давления (ударная волна), распространяющийся от места возникновения разряда, как из центра возмущения, и сопровождающийся интенсивным излучением света и звука. Высокая температура разряда обусловливает искровой характер спектра излучения, переходящего при больших мощностях в непрерывный фон.

Повышенный интерес к импульсному разряду объясняется важными физическими особенностями этого явления и широким применением его в технике. Среди технических применений импульсного разряда в первую очередь следует отметить фотографирование быстро протекающих апериодических процессов (полет снарядов, пуль) и стробоскопию, для которых импульсный разряд благодаря высокой яркости, кратковременности и относительной простоте управления является незаменимым источником света.



Фиг. 3. Трубчатые импульсные лампы.



Фиг. 4. Шаровая импульсная лампа.

На фиг. 3 и 4 представлены два типа импульсных ламп, применяемых в настоящее время для целей стробоскопии. Трубчатые импульсные лампы (фиг. 3) представляют собой стеклянную или кварцевую трубку, по концам которой впаяны два электрода — анод и катод. Третьим, управляющим электродом чаще всего служат несколько витков проволоки, обмотанных вокруг лампы. При подаче на управляющий электрод высоковольтного импульса с крутым фронтом возникает необходимая для пробоя ионизация наполняющего лампу газа.

Внутренний диаметр трубчатых импульсных ламп составляет обычно несколько миллиметров; у мощных ламп он может быть заметно больше. Длина трубки колеблется от 2—3 *см* до 1—2 *м*. В большинстве случаев длинные трубчатые лампы выполняют в виде спирали либо изгибают в виде буквы U или W. Трубчатые импульсные лампы наполняются инертным газом, преимущественно криптоном или ксеноном, при давлении в несколько десятков миллиметров ртутного столба. Спектр излучения мощных трубчатых ламп близок к излучению черного тела при температуре 6 000° К. При наполнении таких ламп ксеноном светоотдача их достигает 40 *лм · сек/дж*; при наполнении криптоном светоотдача примерно в 1,5 раза ниже. Длительность вспышки трубчатых импульсных ламп в зависимости от электрических параметров схемы включения и конструкции лампы лежит в пределах от 10^{-5} до 10^{-3} сек. Мгновенная сила света их достигает многих миллионов свечей.

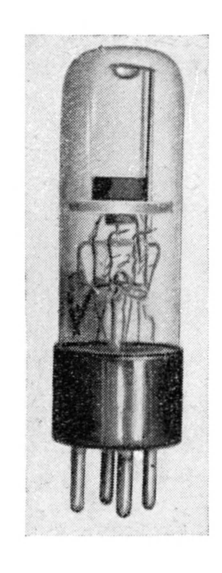
Основными недостатками трубчатых импульсных ламп являются сравнительно большая длительность вспышки и относительно сложная схема их управления. Последнее обстоятельство особенно сказывается в тех случаях, когда необходимо иметь большую частоту повторения вспышек.

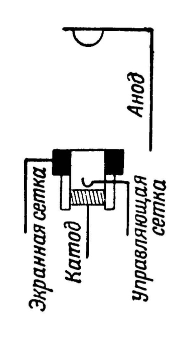
Исключительно высокие мгновенные яркости, достигающие нескольких миллионов стильб, могут быть получены при помощи шаровых импульсных ламп (фиг. 4). Температура разряда в мощных шаровых лампах достигает в момент вспышки десятков тысяч градусов. Длительность вспышки шаровых ламп может быть доведена до 10^{-6} сек.; специальные методы позволяют получать еще более короткие вспышки света. Шаровые лампы хорошо работают в диапазоне частот до 1 000 *гц*. Управление ими значительно проще, чем трубчатыми лампами, так как в отличие от трубчатых управляющий электрод у шаровых ламп находится внутри колбы. Междуэлектродное расстояние составляет обычно у шаровых ламп несколько миллиметров. Наполняются шаровые лампы аргоном, криптоном или ксеноном при давлении порядка нескольких атмосфер. Светоотдача шаровых ламп в несколько раз ниже, чем у трубчатых.

Серьезным недостатком шаровых импульсных ламп является быстрое разрушение катода, в результате распыления которого колба лампы покрывается темным непрозрачным налетом. Для увеличения срока службы шаровых ламп в них часто насыпают небольшое количество вольфрамовой

крупки, позволяющей путем легкого встряхивания лампы производить механическую очистку колбы от непрозрачного налета.

В тех случаях, когда необходимо освещать большие поверхности, скорость движения которых не слишком велика, следует пользоваться трубчатыми лампами. Шаровые лампы полезны как точечный источник света высокой яркости; их можно рекомендовать для исследования малых объектов, движущихся с большой скоростью.





Фиг. 5. Стробо-трон и его устройство.

Весьма полезным источником света для маломощных стробоскопов является импульсная лампа, известная под названием «строботрон». В отличие от шаровых и трубчатых импульсных ламп, работающих при высоком напряжении (редко ниже 1 *кв*) и требующих высоковольтного (до 10—15 *кв*) импульса зажигания, для работы строботрона достаточно напряжение 250 *в*.

Внешний вид строботрона и его устройство показаны на фиг. 5. Строботрон представляет собой двухсеточный тиратрон с холодным катодом, способным выдерживать кратковременные импульсы тока порядка 100 *а* с частотой повторения импульсов до 250 *гц*. Наполняется строботрон обычно неоном при давлении 15—20 *мм* рт. ст. Особенностью строботрона является цезиевый катод, обеспечивающий срок службы порядка сотен часов без какого-либо потемнения колбы лампы. Катод строботрона выполнен в виде чашечки, содержащей соединение цезия, которое постепенно разлагается при работе лампы, выделяя свободный цезий. Зажигание строботрона осуществляется обычно путем подачи на управляющую сетку отрицательного импульса амплитудой 100—150 *в*. При этом между управляющей и экранной сетками возникает разряд, создающий начальную ионизацию, необходимую для вспышки лампы. Мощность, потребная

для зажигания строботрона, не превышает сотых долей ватта. Длительность вспышки строботрона имеет величину порядка 10^{-5} сек.

Освещенность, создаваемая при помощи строботрона, сравнительно мала. Поэтому чаще всего его применяют в качестве источника света для стробостахометров, а также при работе в затемненном помещении. Помимо своего основного назначения, строботрон может успешно применяться в различных электронных схемах (например, в схемах управления трубчатыми импульсными лампами).

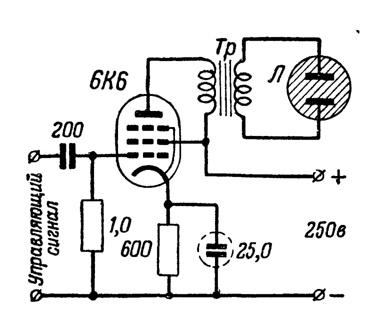
В некоторых случаях в качестве источника света для целей стробоскопии успешно применяется управляемая воздушная искра. Наряду со многими недостатками (неустойчивая работа, низкая светоотдача, высокое рабочее напряжение) воздушная искра обладает и рядом бесспорных достоинств, к числу которых в первую очередь надо отнести ее доступность, малую длительность свечения и возможность высокой частоты повторения вспышек.

Схемы питания. Всем хорошо известны обычные люминесцентные лампы, все шире применяемые для промышленного и бытового освещения ввиду высокой их экономичности и хорошей цветопередачи. При горении люминесцентных ламп на переменном токе часто возникает нежелательный стробоскопический эффект. Особенно неприятно это явление в условиях производства, так как кажущаяся остановка станков, ременных передач, маховиков и других периодически движущихся деталей может привести к авариям и несчастным случаям. Для борьбы с этим опасным явлением применяются специальные схемы включения люминесцентных ламп.

Почему же мало заметен стробоскопический эффект при освещении лампами накаливания? Объясняется это тем, что вследствие большой тепловой инерции нити накала температура ее не успевает заметно измениться, несмотря на значительные, но быстрые колебания переменного тока. В газоразрядных лампах свет создается в результате возбуждения атомов — процесса почти безинерционного. Колебания электрического тока, текущего через лампу, вызывают поэтому соответствующие изменения ее светового потока, в результате которых и возникает стробоскопический эффект. Явление это хорошо известно и широко применяется при измерении скольжения асинхронных машин. Обычно

для этой цели используют неоновую лампу, питающуюся от одной сети с исследуемой машиной.

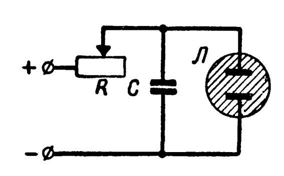
Стробоскопические картины, возникающие при питании газоразрядных ламп синусоидальным напряжением, получаются весьма размытыми, так как ток через лампу протекает в течение значительной части периода. Для уменьшения длительности свечения необходимо питать газоразрядную лампу резкими импульсами тока. Достигается это либо при помощи импульсных трансформаторов, либо путем разряда через лампу конденсатора достаточной емкости.



Фиг. 6. Схема управления с импульсным трансформатором.

На фиг. 6 приведена принципиальная схема включения газоразрядной лампы *Л* (неоновая лампа без балластного сопротивления), применяемая в одном из американских стробоскопов, работающем в диапазоне от 15 до 1 400 *гц*.

Отличительной особенностью трансформаторных схем питания является то, что при их помощи можно сравнительно просто получить высокую частоту вспышек газоразрядной лампы. По мощности, однако, и, следовательно, по достигаемой освещенности объекта трансформаторные схемы питания заметно уступают конденсаторным.

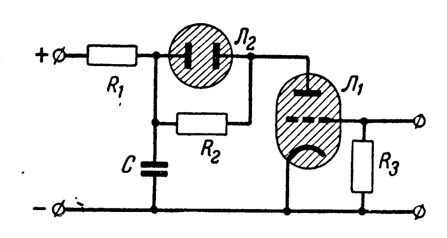


Фиг. 7. Релаксационная схема.

Простейшей конденсаторной схемой является релаксационная (фиг. 7). Для работы схемы необходим источник питания с напряжением, превышающим потенциал зажигания газоразрядной лампы *Л*. Как только конденсатор *С* зарядится до напряжения, равного потенциалу зажигания, произойдет разряд его через лампу, вследствие чего возникнет яркая вспышка света. При достаточной величине зарядного сопротивления *R* лампа погаснет, и вторая ее вспышка произойдет лишь тогда, когда напряжение на конденсаторе снова достигнет потенциала зажигания. Регулируя величину зарядного сопротивления (или емкость конденсатора), мож-

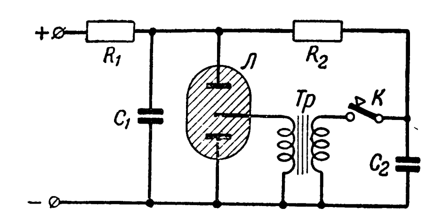
но, таким образом, изменять в широких пределах частоту вспышек лампы.

Подобная схема мало пригодна для целей стробоскопии, так как из-за непостоянства потенциала зажигания лампы имеет место заметный разброс вспышек во времени, что приводит к неустойчивости стробоскопической картины («дрожание»). Для повышения стабильности частоты и фазы вспышек можно накладывать на электроды лампы синхронизирующее переменное напряжение.



Фиг. 8. Схема последовательного управления.

Очень четкие стробоскопические картины могут быть получены при помощи схемы последовательного управления (фиг. 8), позволяющей осуществлять весьма высокую частоту повторения вспышек (до нескольких тысяч герц). Управляющим элементом в этой схеме служит обычно мощный высоковольтный тиратрон $Л_1$. Конденсатор C заряжается до напряжения, заметно превышающего потенциал зажигания газоразрядной лампы $Л_2$. Разряд конденсатора через тиратрон и лампу происходит при подаче на сетку тиратрона отпирающего импульса.



Фиг. 9. Схема включения импульсной лампы с управляющим электродом.

Недостатком схемы последовательного управления является бесполезная потеря значительной части энергии, запасенной в конденсаторе, внутри управляющего элемента. При выборе последнего необходимо принимать во внимание приложенное анодное напряжение, а также среднее и пиковое значения анодного тока.

Схема с последовательным управляющим элементом применяется в настоящее время лишь в некоторых специальных случаях.

Наиболее просты и удобны схемы, предназначенные для использования импульсных ламп с управляющим электро-

дом (фиг. 9). Схемы включения шаровых и трубчатых ламп принципиально ничем не отличаются; последние требуют для зажигания несколько более мощного импульса. Импульс этот возникает на вторичной обмотке трансформатора *Тр*, через первичную обмотку которого при замыкании ключа *К* разряжается небольшой конденсатор C_2. Для хорошей работы импульсной лампы необходим зажигающий импульс порядка 10—15 *кв* крутизной 10^8—10^9 *в/сек*. Такой импульс легко может быть получен при помощи катушки, применяемой для зажигания в автомобильных и авиационных двигателях.

При расчете схемы питания следует прежде всего выбрать тип импульсной лампы. Выбор лампы определяется необходимым количеством света, частотой повторения вспышек, их допустимой длительностью, а также условиями работы.

Зная светоотдачу лампы, можно по формуле

$$E = \frac{F}{L}$$

(где F — необходимое количество света, *лм·сек*; L — светоотдача лампы, *лм·сек/дж* и E — энергия вспышки, *дж*) найти электрическую энергию, нужную для создания каждой отдельной световой вспышки.

Энергия вспышки приближенно связана с напряжением и емкостью разрядного конденсатора известным соотношением

$$E = \frac{CU^2}{2},$$

из которого легко определить емкость разрядного конденсатора, так как напряжение на нем задано характеристикой импульсной лампы. Чтобы получить емкость в микрофарадах, надо выражать энергию в джоулях, а напряжение в киловольтах.

Электрическая мощность в ваттах, выделяемая при этом в импульсной лампе, будет равна:

$$P = \frac{CU^2 f}{2},$$

где f — частота повторения вспышек, *гц*.

Энергия отдельной вспышки E и средняя мощность P не должны превышать предельных значений, допустимых для данного типа импульсной лампы.

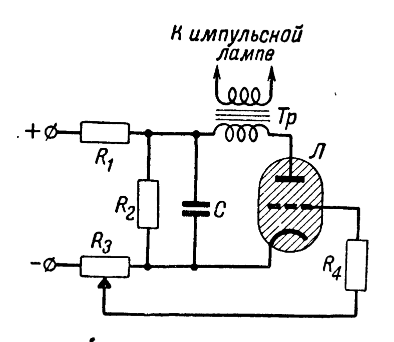
В случае заряда конденсатора через сопротивление мощность P', потребляемую схемой от источника питания постоянного тока, можно подсчитать по формуле

$$P' = 2P.$$

Иногда заряд конденсатора производят не через сопротивление, а через дроссель. Это позволяет получить на разрядном конденсаторе напряжение, превышающее напряжение источника питания, а также снизить потери в зарядном устройстве.

Следует иметь в виду, что для получения световых вспышек малой длительности целесообразно применять конденсатор возможно меньшей емкости, повышая энергию вспышки за счет увеличения напряжения; длительность вспышки приблизительно пропорциональна значению разрядной емкости.

Наличие индуктивности в разрядном контуре также повышает длительность световой вспышки. Особенно неблагоприятно сказывается индуктивность при работе с шаровыми импульсными лампами, вызывая резкое снижение их светоотдачи. Для уменьшения индуктивности разрядного контура желательно применять безиндукционные конденсаторы и монтировать импульсную лампу непосредственно на их выводах.



Фиг. 10. Релаксационная схема для регулирования частоты зажигающих импульсов.

Схемы регулирования частоты вспышек и отсчетные устройства. Плавная регулировка частоты вспышек может быть достигнута при помощи несложной релаксационной схемы, изображенной на фиг. 10. Частота управляющих импульсов, возникающих на вторичной обмотке зажигающего трансформатора *Тр*, регулируется путем изменения смещения на сетке тиратрона *Л*. Добиться стабильной работы такой схемы не удается даже при наличии стабилизированного источника питания с хорошим фильтром. Для измерения частоты импульсов, генерируемых подобными схемами, в зарядную цепь конденсатора *C* часто включают

миллиамперметр. При соблюдении некоторых условий (стабилизированное питание, достаточно малая постоянная времени заряда конденсатора и небольшие утечки) средний зарядный ток i [*а*] связан с частотой импульсов f [*гц*] следующим соотношением:

$$i = fCU,$$

где U — напряжение источника питания, *в*;

C — емкость конденсатора, *ф*.

Таким образом, шкалу миллиамперметра можно непосредственно отградуировать в герцах или в об/мин.

Стробоскопы, снабженные таким отсчетным устройством, редко обеспечивают точность, превосходящую $\mp 2\%$ от верхней границы диапазона.

В хороших стробоскопических приборах для регулирования частоты используют, как правило, отдельный задающий генератор и лишь затем формируют сигналы, пригодные для управления импульсной лампой. Существует большое количество задающих генераторов, обладающих высокой стабильностью и точностью в нужном для целей стробоскопии диапазоне частот. Однако такие генераторы ввиду их сложности и дороговизны редко применяются в стробоскопических приборах. Как правило, в стробоскопических приборах предпочитают пользоваться простыми и дешевыми задающими генераторами типа мультивибратора, предусматривая в приборе гнезда внешней синхронизации, на которые в случае нужды может быть подан точный сигнал от внешнего генератора. Преимуществом мультивибратора по сравнению с более стабильным и также достаточно простым RC-генератором синусоидальных колебаний является большая крутизна генерируемых мультивибратором колебаний. Такие колебания можно непосредственно подавать на сетку тиратрона, формирующего сигнал для управления импульсной лампой, не опасаясь разброса зажигания тиратрона по фазе.

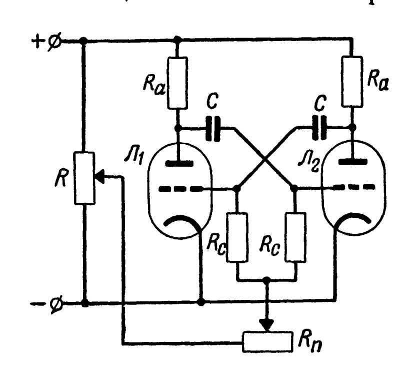
Подробные сведения о мультивибраторах можно найти в различных руководствах по радиотехнике и электронике. Теория действия мультивибраторов и методы их расчета хорошо изложены в книге А. М. Бонч-Бруевича «Применение электронных ламп в экспериментальной физике», ГИТТЛ, 1950.

На фиг. 11 приведена принципиальная схема симметричного мультивибратора с положительным смещением, часто

применяемая в стробоскопических приборах. Схема эта обычно собирается на двойном триоде типа 6Н7С или 6Н8С. Достоинством схемы является простая регулировка частоты и достаточно высокая стабильность (до 1%) ее при значительном изменении напряжения питания и параметров ламп. Частоту колебаний f, генерируемых схемой, можно оценить по приближенной формуле

$$f = \frac{k}{CR_c},$$

в которой коэффициент k в зависимости от величины положительного смещения изменяется в пределах от 0,3 до 1,5. С увеличением положительного смещения частота генерируемых колебаний возрастает.



Фиг. 11. Схема симметричного мультивибратора с положительным смещением.

Если предварительно проградуировать потенциометр R, служащий для изменения величины положительного смещения, то отсчет частоты можно производить по шкале генератора. При этом, однако, на шкале генератора необходимо иметь хотя бы одну опорную точку, в которой можно было бы периодически проверять частоту генерируемых колебаний. Такая необходимость вызвана неизбежным изменением параметров радиодеталей (особенно высокоомных сопротивлений) с течением времени.

Для контроля генератора в стробоскопических приборах применяют обычно электромагнитный вибратор, возбуждаемый от сети переменного тока. Язычок вибратора колеблется с вынужденной частотой, которая либо равна двойной частоте сети (100 *гц*), либо если вибратор имеет обмотку подмагничивания (поляризованный вибратор), совпадает с нею. Чтобы язычок вибратора колебался с достаточной амплитудой, собственная частота его должна совпадать с частотой вынуждающих колебаний. Настройка вибратора на 50 или 100 *гц* производится путем изменения длины язычка (грубо) и опиловкой груза на конце язычка (точно).

При освещении колеблющегося вибратора импульсной лампой, частота вспышек которой задается генератором, язычок покажется наблюдателю неподвижным, если частота вспышек импульсной лампы совпадает с частотой колебаний вибратора. Так как частота колебаний вибратора известна, то для проверки генератора достаточно установить указатель на соответствующее деление шкалы прибора и, осветив вибратор импульсной лампой, убедиться в его кажущейся неподвижности. Отсутствие такой неподвижности вибратора свидетельствует об изменении параметров радиодеталей; для компенсации этих изменений следует предусмотреть в схеме подстроечный элемент. Таким подстроечным элементом может служить, например, переменное сопротивление в цепи сеток (R_n на фиг. 11).

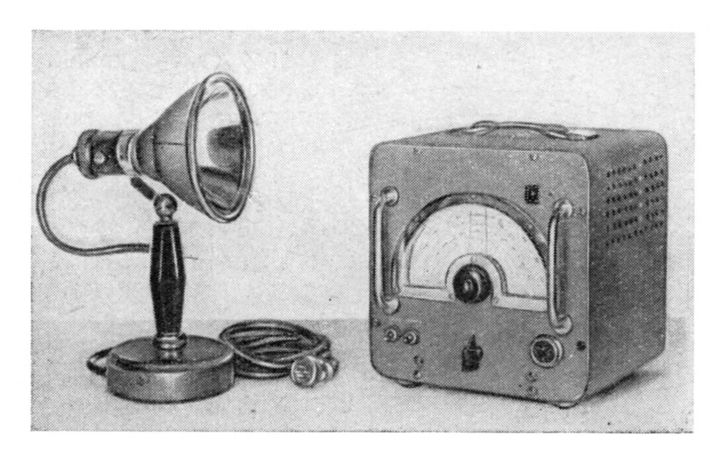
РАЗЛИЧНЫЕ СТРОБОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Для удовлетворения потребностей народного хозяйства был разработан стробсодахометр типа СТ-4, предназначенный для измерения скорости вращения или колебания движущихся деталей машин и аппаратов, а также для изучения особенностей их движения и работы. Прибор предназначен для работы в лабораторных условиях и обеспечивает освещенность объектов диаметром до 20 *см*, достаточную как для визуального наблюдения в незатемненном помещении, так и для их фотографирования.

Стробоtaхометр СТ-4 (фиг. 12) представляет собой переносный генератор световых вспышек, частота повторения которых может плавно изменяться в пределах от 5 до 500 *гц*. Источником света в приборе служит шаровая импульсная лампа, установленная внутри небольшого отражателя и соединенная с прибором безиндукционным гибким кабелем длиной около 2 *м*. Отсчет частоты вспышек производится по шкале, отградуированной в об/мин и имеющей три диапазона: 300—1 200, 1 200—6 000 и 6 000—30 000 об/мин. Выбор диапазона осуществляется при помощи переключателя; изменение частоты вспышек внутри диапазона производится путем вращения верньера, имеющего ручки плавной и грубой регулировки. Для контроля шкалы служит электромагнитный вибратор, колеблющийся с удвоенной частотой сети и расположенный в правом верхнем углу прибора. Каждый из трех диапазонов имеет отдельный под-

строечный винт; винты эти расположены на задней панели прибора. Там же находятся предохранители, позволяющие включить прибор на 127 или 220 *в*. Для работы с внешним задающим генератором в приборе предусмотрены гнезда внешней синхронизации. Синхронизация может быть обеспечена положительным импульсом или переменным напряжением любой формы амплитудой от 5 до 100 *в*.

Задающим генератором в приборе служит мультивибратор с отрицательной обратной связью, частота колебаний которого при изменении напряжения питающей сети на



Фиг. 12. Стробротахометр СТ-4.

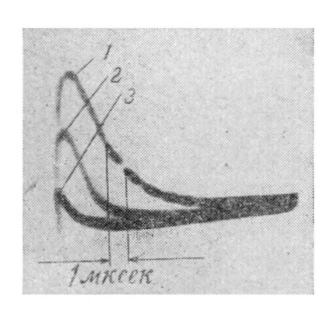
$\mp 8\%$ меняется менее чем на $\mp 0{,}2\%$. Сигнал от задающего генератора подается на сетку тиратрона, формирующего высоковольтный импульс, необходимый для управления импульсной лампой. Импульс этот, попадая на управляющий электрод импульсной лампы, вызывает ионизацию наполняющего лампу газа, вследствие чего резко снижается ее пробивное напряжение. При этом происходит разряд конденсатора через импульсную лампу. Прохождение тока через лампу сопровождается ярким свечением газа длительностью порядка нескольких микросекунд. На фиг. 13 приведена осциллограмма световых вспышек импульсной лампы стробротахометра СТ-4, полученная при помощи импульсного фотометра ИФ-1.

Точность стробротахометра СТ-4 составляет $\pm 1\%$ от из-

меряемой величины, вес прибора с осветителем — около 16 *кг* и потребляемая от сети мощность — менее 80 *вт*.

Из других стробоскопов отметим американские и английские строботахометры, известные под названием «стробо-так». Приборы эти очень удобны и портативны; источником света в них служит строботрон. При их помощи можно производить измерения в диапазоне от 600 до 14 000 об/мин. Гарантированная фирмой точность измерения $\pm 1\%$ представляется несколько завышенной.

При измерении скорости вращения при помощи строботахометров нередко допускаются грубые ошибки, вызванные недостаточным знакомством с особенностями стробоскопического эффекта. Независимо от типа строботахометра во всех случаях, когда нет каких-либо указаний о скорости изучаемого объекта, измерения следует начинать с самой высокой частоты вспышек (или мельканий, если работа ведется с механическим стробоскопом). Двойное неподвижное изображение объекта, появляющееся в результате медленного снижения частоты вспышек, свидетельствует о том, что основной синхронизм может быть достигнут при вдвое меньшей частоте вспышек. При этом должно быть видно одно неподвижное изображение объекта. Так как при частоте вспышек, равной $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$... от скорости движения объекта, также будет видно одно неподвижное изображение, то необходимо помнить, что правильному отсчету соответствует наибольшая частота вспышек, при которой наблюдается одно неподвижное изображение объекта. Для измерения числа оборотов гладких дисков или осей рекомендуется во избежание ошибки наносить на них какой-либо знак (например, меловую точку).



Фиг. 13. Осциллограмма световых вспышек строботахометра СТ-4.

1—в диапазоне 300—1 200 об/мин; *2* — в диапазоне 1 200 — 6 000 об/мин; *3* — в диапазоне 6 000 — 30 000 об/мин.

При работе со строботахометрами может возникнуть грубая ошибка, вызванная тем, что скорость измеряемого объекта превышает верхний предел шкалы строботахометра. Так, если измеряемый объект делает 30 000 об/мин, а верхний предел строботахометра 20 000 об/мин, то двойное не-

подвижное изображение появится при отсчете 20 000 об/мин и одно неподвижное изображение при вдвое меньшем отсчете. Свидетельством о неблагополучии в этом случае будет то, что при отсчете 15 000 об/мин также появится одно неподвижное изображение.

Если число оборотов N измеряемого объекта превышает верхний предел стробот­ахометра, то определить скорость вращения можно по формуле

$$N = \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2},$$

где n_1 и n_2 — два следующие друг за другом отсчета, соответствующие одному неподвижному изображению объекта. Пользуясь этой формулой для рассмотренного выше случая, найдем:

$$N = \frac{15\,000 \cdot 10\,000}{15\,000 - 10\,000} = 30\,000 \text{ об/мин}.$$

Поскольку разность $n_1 - n_2$ может оказаться малой, то, чтобы повысить точность, можно определять N по формуле

$$N = m \frac{n'_1 n'_2}{n'_1 - n'_2},$$

где n'_1 и n'_2 — любые отсчеты, соответствующие одному неподвижному изображению объекта;

m — число таких изображений, появляющихся при переходе от n'_1 к n'_2.

Следует иметь в виду, что при таких способах определения скоростей, превышающих верхний предел стробот­ахометра, точность снижается по сравнению с точностью отсчета

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{n_1 + n_2}{n_1 - n_2} \frac{\Delta n}{n}.$$

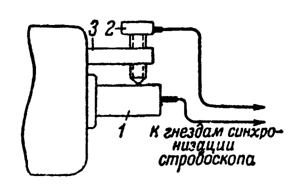
Если в разобранном выше примере измерения производились с точностью $\mp 1\%$, то ошибка полученного результата, таким образом, может достигать:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{15\,000 + 10\,000}{15\,000 - 10\,000} (\pm 1\%) = \mp 5\%.$$

Чтобы не допускать столь значительной ошибки, следует грубо оценить скорость измеряемого объекта при помощи

одного из указанных способов, а затем произвести измерение по кратной стробоскопической картине, умножая полученный отсчет на соответствующий коэффициент кратности. Таким путем можно с высокой точностью определять скорости, лежащие далеко за верхним пределом шкалы строботахометра.

Для работы электрических машин переменного тока важное значение имеет величина, называемая скольжением,— разность между синхронной и истинной скоростью машины. Так как синхронная скорость всегда известна, то, измерив при помощи строботахометра число оборотов, легко найти и скольжение. Для очень точного измерения скольжения можно подать сигнал от строботахометра на электронный смеситель, питаемый одновременно частотой сети, от которой работает машина. Разностная частота, получающаяся на выходе смесителя при измерении скорости вращения машины строботахометром, даст возможность непосредственно определить скольжение.



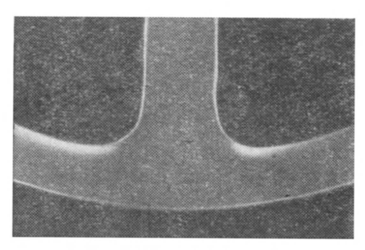
Фиг. 14. Способ определения деформации вращающегося вала.
1 — вал; 2 — микрометрический винт; 3 — изолятор.

На фиг. 14 показано, как при помощи стробоскопа можно легко обнаружить даже небольшую деформацию вала, возникающую при работе машины. При освещении стробоскопом вал покажется наблюдателю неподвижным именно в том положении, при котором микрометрический винт коснется одной из его точек.

Для правильного конструирования различных деталей необходимо учитывать не только их деформацию, но и напряжения, возникающие в материале при работе этих деталей. Далеко не всегда удается определить эти напряжения и места их возникновения расчетным путем. Во многих случаях бывает гораздо проще изготовить модель детали из целлулоида и поставить ее в те же условия, при которых должна работать изучаемая деталь. Благодаря замечательной особенности целлулоида изменять под действием механических напряжений свои оптические свойства, при освещении модели поляризованным светом в местах появления напряжений возникают темные и светлые участки. Подробное объяснение механизма этого явления интересующиеся могут найти в одном из курсов оптики, например в книге Г. С. Ландсберга «Оптика». Отметим лишь, что для обна-

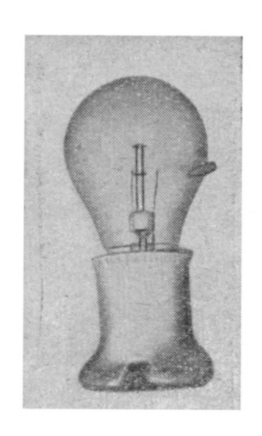
ружения напряжений в целлулоидных моделях необходимы два поляроида, один из которых служит поляризатором, а другой — анализатором. Исследуемая модель помещается между ними.

На фиг. 15 приведен снимок вращающейся модели махового колеса, полученный в поляризованном свете стробоскопа; места просветлений на снимке соответствуют местам возникновения в модели динамических напряжений.



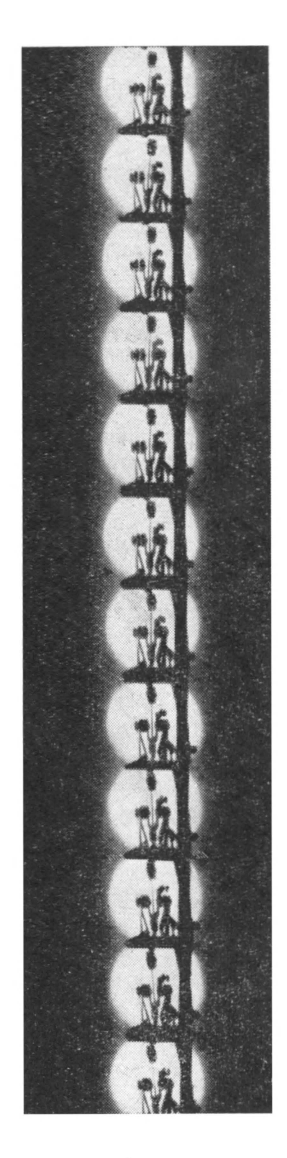
Фиг. 15. Напряжения во вращающейся модели махового колеса.

При помощи стробоскопов чрезвычайно удобно производить фото-и киносъемку быстро перемещающихся объектов. На фиг. 16 приведена фотография пули в тот момент, когда она пробивает стеклянную колбу лампы накаливания; момент вспышки импульсной лампы задавался сигналом на гнезда внешней синхронизции стробоскопа. Для осуществления киносъемки достаточно осветить фотографируемый объект светом стробоскопа и спроектировать его изображение при помощи объектива на непрерывно движущуюся пленку. Время экспозиции будет при этом задано длительностью вспышки импульсной лампы, а количество кадров в секунду — частотой вспышек стробоскопа. Скорость движения пленки должна быть выбрана такой, чтобы за время между двумя вспышками пленка успела переместиться на величину, несколько превосходящую размер изображения объекта. На фиг. 17 приведена выполненная таким способом фотография работы контактов вибропреобразователя.



Фиг. 16. Пуля, пробивающая стеклянную колбу лампы накаливания.

При киносъемке при помощи стробоскопа предметов, находящихся в периодическом движении, можно получить последовательность мгновенных фотографий исследуемого объекта, разделенных сколь угодно малой частью периода. Для этого надо



Фиг. 17. Серия снимков работающих контактов, полученная при помощи стробоскопа.

так подобрать частоту вспышек импульсной лампы, чтобы фотографируемый объект казался наблюдателю медленно перемещающимся. Если кажущаяся скорость его движения N, а частота вспышек лампы f, то период движения объекта будет разбит на f/N кадров. Нетрудно понять, что разные кадры при этом соответствуют разным периодам и каждый из них сдвинут по фазе относительно предыдущего. Такой прием позволяет осуществлять фотографирование, эквивалентное киносъемке с очень большим числом кадров в секунду.

В иностранной литературе описан мощный стробоскоп, предназначенный для целей скоростной киносъемки. Этот прибор создает серию в 1 000 световых вспышек; интервал времени между отдельными вспышками можно регулировать от 0,01 до 0,00025 сек. Вспышки создаются благодаря разряду конденсатора емкостью 0,1 *мкф*, заряженного до напряжения 12 *кв*, через ксеноновую импульсную лампу, включенную последовательно с водородным тиратроном. Длительность каждой вспышки составляет $5 \cdot 10^{-6}$ сек. Количество света, создаваемое отдельной вспышкой, достаточно для фотографирования объекта размером около 1 $м^2$.

Примером любопытного применения стробоскопического эффекта может служить стробоскопический индукционный компас. Рамка, состоящая из 1 000 витков площадью около 15 $см^2$, вращается в магнитном поле Земли со скоростью 3 600 об/мин, вследствие чего на ней

возникает синусоидальное напряжение порядка 10 *мв*. Это напряжение после усиления в 30 000 раз используется для управления частотой вспышек импульсной лампы, в свете которой рассматривается шкала компаса, находящаяся на одной оси с рамкой. Очевидно, что рамка всегда кажется неподвижной, но положение ее кажущейся неподвижности зависит от направления, в котором ее пронизывает магнитное поле Земли. Изменение скорости вращения рамки мало сказывается на показаниях прибора; очень опасен, однако, непостоянный сдвиг фазы в усилителе.

Исключительно высокую частоту световых вспышек можно получить путем электронной бомбардировки флуоресцирующего экрана. В одном из подобных устройств в качестве источника световых вспышек применялся триод, анод которого был покрыт люминофором. Триод включался по схеме блокинг-генератора; при напряжении на аноде 1 000 *в* импульсы тока составляли 5 *а*. Длительность световой вспышки не превышала 10^{-6} сек., максимальная сила света достигала 10^4 свечей, а частота повторения вспышек — 200 000 *гц*.

Подобным же образом может быть использована электроннолучевая трубка, управляемая обычным триодом.

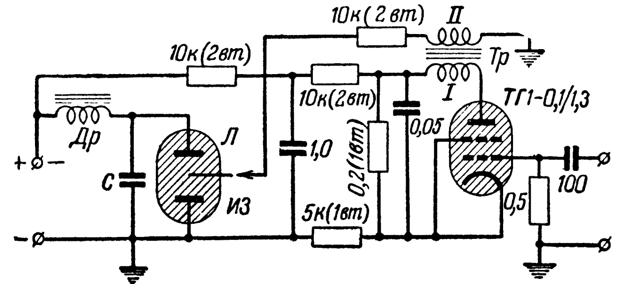
Очень интересный стробоскоп может быть устроен при помощи электроннооптического преобразователя. Электроннооптический преобразователь представляет собой электровакуумный прибор, предназначенный для преобразования инфракрасного излучения в видимое. Выполняется он в виде небольшого стеклянного цилиндра с плоскими торцовыми окнами. На одном из окон находится фотокатод, параллельно которому расположен флуоресцирующий экран, наблюдаемый сквозь второе окно. Между фотокатодом и экраном помещается система ускоряющих и фокусирующих электродов — так называемая электронная оптика. Изображение наблюдаемого объекта при помощи обычной линзы или объектива фокусируется на фотокатод электроннооптического преобразователя. Освобожденные из фотокатода под действием инфракрасного излучения электроны ускоряются, фокусируются и, попадая на флуоресцирующий экран, создают видимое изображение объекта. Если питать электроды преобразователя импульсами высокого напряжения, то получится электроннооптический затвор, частота срабатывания которого может плавно регулироваться изменением частоты электрических импульсов. Время открытия затвора целиком определяется длительностью импульса и может быть сде-

лано чрезвычайно малым (менее 1 *мксек*). Так как свет на входе и выходе такого затвора создается различными источниками, то «пропускание» его может превышать 100%. Частота открывания затвора может быть доведена до многих тысяч герц, что также выгодно отличает подобное устройство от обычных механических стробоскопов.

Необходимо отметить, однако, что изготовление такого стробоскопа связано с рядом трудностей, возникающих главным образом ввиду необходимости сложной электрической схемы, обеспечивающей импульсы амплитудой порядка 10 *кв* при правильном распределении потенциалов на электродах преобразователя.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОСТЕЙШИХ СТРОБОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Простая и надежно работающая схема стробоскопа с внешней синхронизацией изображена на фиг. 18. Схема предназначена для работы с частотой до 500 *гц*, регулируе-

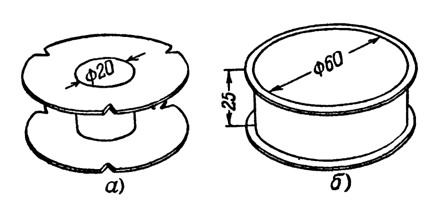


Фиг. 18. Принципиальная схема стробоскопа с внешней синхронизацией.

мой внешними положительными сигналами амплитудой в несколько десятков вольт. Для нормальной работы схемы емкость конденсатора *С*, разряжающегося через лампу *Л*, в качестве которой использована импульсная лампа от стробоскопа СТ-4, не должна превосходить 3 *мкф* при частоте повторения вспышек до 25 *гц*; 1 *мкф* при частоте вспышек до 100 *гц* и 0,25 *мкф* — при частоте до 500 *гц*. Источником питания схемы может служить любой двухполупериодный выпрямитель с фильтром, обеспечивающий выходную мощность около 50 *вт* при напряжении 400—450 *в*. При заряде конденсатора *С* через дроссель *Др* напряжение на нем мо-

жет заметно превосходить напряжение источника питания, достигая при некоторых частотах повторения вспышек 800—900 *в*. В качестве сердечника зарядного дросселя следует применять набор пластин трансформаторной стали Ш-19 или Ш-20 без воздушного зазора; толщина набора — 50 *мм*. Катушка дросселя, состоящая из 12 000 витков провода ПЭЛ 0,16, должна быть хорошо изолирована от сердечника.

Особое внимание следует обратить на изготовление зажигающего трансформатора *Тр*. Обмотка *II* его, имеющая 8 000 витков провода ПЭТ 0,08, наматывается на каркас, изготовленный из органического стекла (фиг. 19,*а*). Каждый ряд обмотки следует изолировать двумя слоями конденсаторной бумаги, постепенно уменьшая по мере намотки ширину ряда. Обмотка *I* наматывается на другой каркас из органического стекла (фиг. 19,*б*) и состоит из 300 витков провода ПЭТ 0,2. После намотки каркас *а* вставляется в каркас *б*, отверстие в каркасе *а* заполняется обрезками трансформаторной стали, после чего трансформатор тщательно парафинируется под вакуумом.



Фиг. 19. Каркасы для намотки зажигающего трансформатора.
а — для обмотки *II*; *б* — для обмотки *I*.

Указанные размеры зажигающего трансформатора не являются особо критичными с точки зрения работы импульсной лампы; значительные отступления от них, однако, могут привести к перегрузке тиратрона и преждевременному выходу его из строя.

При включении зажигающего трансформатора в схему следует заземлять тот конец обмотки *II*, который находится близ сердечника; полярность включения обмотки *I* проще всего определить опытным путем, добиваясь наиболее четкого горения импульсной лампы.

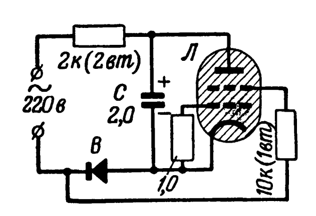
Провод, соединяющий зажигающий трансформатор с управляющим электродом импульсной лампы, должен быть возможно короче; между его концом и управляющим электродом рекомендуется оставлять воздушный зазор порядка нескольких десятых миллиметра.

Индуктивность разрядного контура должна быть минимальной; желательно для этого монтировать импульсную

лампу непосредственно на выводах разрядного конденсатора.

По своим светотехническим характеристикам описанная схема подобна стробоскопу СТ-4.

Компактный и недорогой прибор, весьма полезный для исследования машин переменного тока, легко может быть изготовлен при наличии строботрона. Схема прибора (фиг. 20) чрезвычайно проста. В проводящий полупериод конденсатор заряжается через селеновый выпрямитель *В*, в качестве которого может быть использован столбик, состоящий из 21 шайбы диаметром 18 *мм*. В следующий полупериод, когда ток через выпрямитель не проходит, экранная сетка строботрона оказывается под большим положительным потенциалом относительно катода. Промежуток между сеткой и катодом пробивается, что приводит к разряду конденсатора *С* через строботрон *Л*. Частота вспышек строботрона, таким образом, точно совпадает с частотой сети, от которой питается схема. Малая длительность вспышек (порядка 10^{-5} сек.) и сравнительно небольшой разброс их по фазе позволяют успешно применять эту схему для определения скольжения асинхронных машин.



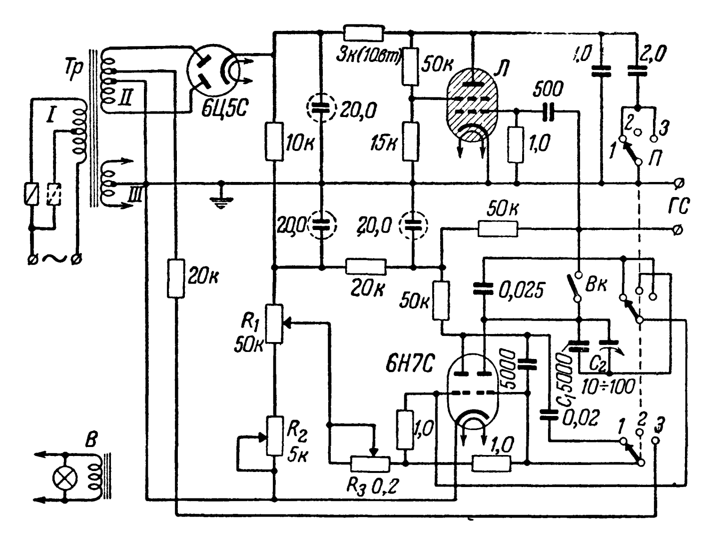
Фиг. 20. Схема для работы строботрона от сети с частотой 50 *гц*.

На фиг. 21 приведена схема стробоахометра, аналогичная американскому прибору типа «строботак».

Задающим генератором в этой схеме служит мультивибратор с положительным смещением, регулируя величину которого при помощи потенциометра R_1, можно плавно изменять частоту колебаний мультивибратора. Задающий генератор собран на лампе 6Н7С и имеет два диапазона: от 10 до 50 *гц* и от 50 до 250 *гц*. Положение *3* переключателя *П* предназначено для синхронизации работы мультивибратора с частотой сети. Сигнал от мультивибратора подается на управляющую сетку строботрона *Л*, служащего источником световых вспышек. Отключая выключателем *Вк* задающий генератор, можно при помощи гнезд внешней синхронизации *ГС* управлять частотой вспышек ст внешнего контактора. Для нормальной работы строботрона частота замыканий контактора должна находиться внутри соответствующего диапазона, а время замыкания — не превосхо-

дить 10^{-3} сек. Чтобы не применять отдельного выключателя *Вк*, можно использовать в качестве подстроечного сопротивления R_3 потенциометр с оконечным выключателем.

Постоянство шкалы задающего генератора может быть обеспечено только в том случае, если потенциометр R_1, регулирующий частоту, выполнен из проволоки. Самостоятельное изготовление такого потенциометра представляет заметное практическое затруднение, поэтому лучше постараться достать его готовым. Регулируемое сопротивление



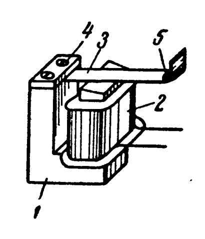
Фиг. 21. Принципиальная схема стробохотахометра.

R_2 также лучше сделать проволочным; в этом случае величину его понадобится изменить только один раз при настройке прибора.

Устройство электромагнитного вибратора *В*, колеблющегося с удвоенной частотой сети и предназначенного для контроля задающего генератора, показано на фиг. 22. Обмотка вибратора имеет 1 200 витков провода ПЭЛ 0,12. Сердечник его сечением около 1 *см*^{2} выполнен из мягкой стали. Язычок вибратора изготовляется из пружинной стали толщиной 0,15 и шириной 3—4 *мм*. Длина язычка (около 30 *мм*) может регулироваться при помощи прижима. Конец язычка (около 3 *мм*) следует отогнуть под прямым углом, напаять на него с внутренней стороны немного припоя, а с наружной — по-

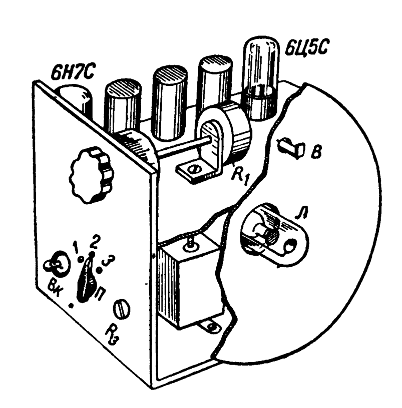
красить белой эмалью. После этого вибратор надо собрать и настроить.

Настройку вибратора удобнее всего производить при помощи генератора звуковой частоты. Для этого надо подключить обмотку вибратора к зажимам генератора и установить выходное напряжение 6,3 *в*. Плавно изменяя частоту генератора вблизи 50 *гц*, следует добиться максимальной амплитуды колебаний вибратора. Если частота, соответствующая максимуму амплитуды, выше 50 *гц*, то длину язычка следует увеличить. Точная настройка вибратора производится путем опиловки груза на конце язычка при включении вибратора в сеть через понижающий трансформатор. При достаточном терпении можно настроить вибратор, не прибегая к помощи звукового генератора, а сразу подключая его к понижающему трансформатору. После настройки винты, крепящие язычок вибратора, следует закрасить. Описанный вибратор потребляет мощность 0,3 *вт* и при частоте сети 49,7—50,3 *гц* обеспечивает размах язычка около 8 *мм*.



Фиг. 22. Устройство электромагнитного вибратора.
1—сердечник; *2* — обмотка; *3* — язычок; *4* — прижим; *5* — припой.

Силовой трансформатор *Тр* собран на сердечнике из пластин Ш-20 при толщине набора 35 *мм*. Сетевая обмотка *I* для включения на 220 *в* состоит из 1 650 витков провода ПЭЛ 0,35 с отводом от 950 витков для включения на 127 *в*, повышающая обмотка *II* — из 2 × 2 000 витков провода ПЭЛ 0,16 с отводом от 600 витков для синхронизации мультивибратора с сетью и накальная обмотка *III* — из 2 × 26 витков провода ПЭЛ 0,9.



Фиг. 23. Расположение деталей на шасси стробостахометра.

Все детали прибора можно уместить в небольшой кожух размером 200×200×200 *мм*. Примерное расположение деталей на шасси показано на фиг. 23. Такое шасси вместе со всеми смонтированными на

нем деталями легко вынимается из кожуха. Строботрон помещается внутри небольшого отражателя, в качестве которого может быть использована автомобильная фара. Там же расположен и язычок вибратора.

Шасси для прибора изготовляется из одного куска мягкой листовой стали толщиной 0,8—1 *мм*. Оно имеет вид буквы П, положенной на бок, и открытой стороной привинчено к передней панели. На верхней полке шасси расположены радиолампы, конденсаторы фильтра, потенциометр R_1 и отсчетное устройство. Внизу помещаются разрядные конденсаторы, трансформатор и все остальные детали.

На передней панели находятся переключатель диапазонов, ручка плавной регулировки частоты и подстроечный винт (ось переменного сопротивления R_3). Для плавной регулировки частоты желательно использовать замедляющий верньер. На задней стенке шасси расположены гнезда внешней синхронизации, предохранители, позволяющие включать прибор на 127 или 220 *в*, и фишка для подключения прибора к сети. В кожухе прибора надо сделать отверстия, соответствующие расположению деталей на задней стенке шасси, а также отверстия для вентиляции. Для переноски и работы с прибором к кожуху следует приделать жесткую ручку, располагая ее параллельно оси рефлектора.

Для отсчета частоты вспышек на оси потенциометра укрепляется барабан диаметром 60—80 *мм*, снабженный делениями, над которым натягивается неподвижная визирная нить. В кожухе прибора над барабаном следует сделать небольшое прямоугольное отверстие для отсчета, прикрытое кусочком тонкого органического стекла. Для удобства отсчета можно изготовить барабан из органического стекла и поместить внутри него подсвечивающую шкалу лампочку.

Отградуировать прибор можно по имеющемуся в нем электромагнитному вибратору. Для этой цели следует поставить переключатель в положение *1*, соответствующее низкой частоте вспышек, и установить максимальную частоту вспышек путем поворота потенциометра R_1. Затем, регулируя сопротивление R_3, надо добиться кажущейся неподвижности вибратора; при этом будет получена на шкале первая точка, соответствующая 3 000 об/мин. Следующее неподвижное изображение вибратора, получающееся при снижении частоты вспышек потенциометром R_1, даст на шкале точку 2 000 об/мин. Третье неподвижное изображение вибратора соответствует 1 500, четвертое — 1 200, пятое — 1 000,

шестое — 857, седьмое — 750, восьмое — 666 и девятое — 600 об/мин. Если окажется, что последние точки поворотом потенциометра R_1 получить не удается или, напротив, они будут лежать далеко от края потенциометра, то следует изменить величину сопротивления R_2 и повторить всю операцию сначала. После этого между точками 2 000 и 3 000 об/мин находят двойное неподвижное изображение вибратора, которое соответствует 2 400 об/мин, а промежутки между всеми полученными точками равномерно разбивают на деления по 50 об/мин. Для градуировки второго диапазона ставят потенциометр R_1 в положение, соответствующее 2 400 об/мин, и путем изменения емкости C_2 добиваются появления двойного неподвижного изображения вибратора. Частота вспышек на втором диапазоне после этого будет во всех точках в 5 раз выше, чем на первом. Если прибор отградуирован правильно, то при положениях потенциометра R_1, соответствующих 600 и 1 200 об/мин, на втором диапазоне также должно быть видно одно неподвижное изображение вибратора.

Может оказаться, что изменение емкости подстроечного конденсатора C_2 недостаточно для настройки второго диапазона; в этом случае надо изменить емкость конденсатора C_1.

При градуировке прибора следует проявлять большую осторожность, так как пропуск какой-либо опорной точки или неправильное ее отождествление приведут к грубейшему искажению шкалы.

Описанный строботахометр является чрезвычайно полезным прибором и необходим каждой научно-исследовательской и заводской лаборатории.

Цена 1 руб.